

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**Соколов Игорь Владимирович**

**Влияние структуры магнитного поля на характер  
магнитогидродинамических течений в  
электромагнитных перемешивателях расплавов**

2.4.4. Электротехнология и электрофизика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2022

Работа выполнена на кафедре электротехники Уральского энергетического института в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,  
**Фризен Василий Эдуардович**

Официальные оппоненты: **Тимофеев Виктор Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск,  
профессор кафедры «Электротехника»;

**Казаков Юрий Борисович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново,  
профессор кафедры «Электромеханика»;

**Халилов Руслан Ильдусович**,  
кандидат технических наук,  
«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь,  
старший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики.

Защита состоится 19 октября 2022 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3778>.  
Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

  
Хальясмаа Александра Ильмаровна

## Общая характеристика работы

**Актуальность и степень разработанности темы.** В металлургии широко распространено воздействие электромагнитного поля на расплавы. Взаимодействие токов и магнитного поля позволяет воздействовать не только на проводящие материалы (металлы, полупроводники), но и на вещества, которые в твердом состоянии не взаимодействуют с электромагнитным полем (оксиды, соли). Это явление нашло широкое применение для перемешивания, транспортировки и кристаллизации расплавов.

Во многих случаях для этих целей используются индукторы, создающие бегущее магнитное поле. Оно создается последовательным возбуждением катушек переменным током, что приводит к возникновению движения максимума индукции магнитного поля вдоль индуктора. В проводящих жидкостях под воздействием такого поля наводятся токи, создающие, в свою очередь, усилия в расплаве. Основное преимущество подобного подхода – отсутствие контакта с расплавом, в отличие от механических или кондукционных устройств, а также большие удельные тяговые усилия и возможность управления потоками расплава.

Исследованием взаимодействия бегущих магнитных полей и проводящих жидкостей начали заниматься с 50-х годов XX века, ввиду сложности, связанной с междисциплинарностью проблематики, и до сих пор занимаются различные коллективы по всему миру. Весомый вклад в разработку и исследование внесли отечественные ученые: Ю.К. Круминь, А.И. Вольдек, Ф.Н. Сарапулов, В.Н. Тимофеев, М.Ю. Хацаюк, И.Р. Кириллов и др., кроме того, можно отметить зарубежных коллег из следующих городов: Риги (А. Якович), Берлина (Н. Дропка), Дрездена (С. Эккерт), Гренобля (И. Фаутрель), Лагуата (Л. Хачани), Лондона (В. Бояревич).

Теоретические работы получают свое развитие и на практике. Здесь можно отметить следующие компании, занимающиеся проектированием и производством индукторов бегущего магнитного поля с жидкометаллическом вторичным элементом: НПЦ МГД, НПЦ Энергетика, АBB, SIA «GORS», A/S «Krasainie Lejumi», ZMAG Ltd.

Основное направление современных исследований – описание процессов теплообмена в жидком вторичном элементе при различных конфигурациях электромагнитного поля. Лучшее понимание этих процессов позволяет обеспечить заданные параметры в различных технологических режимах, а именно – распределение примесей в объеме расплава, желаемую скорость перекачки, выравнивание формы фронта кристаллизации слитка и, как следствие, его равномерные свойства.

Для повышения эффективности индукционных устройств электромагнитного перемешивания в литературе предлагается использовать различные решения:

- *Временная модуляция магнитного поля.* При этом способе регулируется амплитуда магнитного поля по периодическому закону, исходя из гидравлической постоянной времени расплава подаются импульсное питание на индуктор. Таким образом изменяется во времени и электромагнитная сила в расплаве. Это позволяет менять направление потока, увеличивать турбулентную кинетическую энергию расплава. Подобный способ позволяет увеличить однородность распределения примеси. Так как в простейшем случае он требует только простой коммутационной аппаратуры, его можно использовать для повышения эффективности даже существующих установок.
- *Выбор оптимальной конфигурации и изменение конструкции обмоток индукторов.* Благодаря этому возможно получать большие усилия в заданных массогабаритах за счет иных параметров, например, увеличивая линейную нагрузку индуктора при сохранении плотности тока в катушках или при использовании электрической изоляции более высокого класса нагревостойкости.
- *Оптимизация параметров питания индуктора: частота, амплитуда тока.* При варьировании электрических параметров индуктора, возможно, например, получать выравнивание фронта кристаллизации, как следствие – повышение качества слитка.
- *Магнитный огнеупорный материал футеровки для уменьшения немагнитного зазора между индуктором и расплавленным металлом.* В таком случае, увеличится усилие, передаваемое электромагнитным полем в расплав. Было предложено использовать данный материал для перемешивателей в составе металлургических агрегатов, например, при обработке цветных металлов и их сплавов ввиду сравнительно малого градиента температур относительно агрегатов для черных металлов.

Вышеприведенные способы не обеспечивают универсального решения, так как совершенствуются частные случаи на конкретных установках.

В отличие от круговых машин с бегущим магнитным полем, в линейных индукторах возникают краевые эффекты, которые оказывают существенное влияние на равномерность распределения магнитного поля во вторичном элементе, а также на равномерность распределения токов по фазам индуктора при равной амплитуде приложенного к катушкам напряжения. При этом изменяются не только амплитуды напряжения и тока, но и угол сдвига фаз между ними. Это связано с наличием разомкнутой магнитной системы в линейных индукторах бегущего магнитного поля. В линейных индукционных машинах с твердым вторичным элементом этот эффект носит отрицательный характер, приводя к неравномерному распределению усилий и изменению характера нагрузки отдельных фаз, вызывая, например, неравномерное распределение активной мощности по

фазам индуктора. Подобные режимы усложняют конструкцию источников питания и алгоритмы управления подобными установками. В магнито-гидродинамических установках эта асимметрия может приводить к более сложной структуре магнитного поля, и, как следствие, к образованию более сложных течений жидкости, что позволяет потенциально повысить эффективность установок.

Кроме того, современные источники питания, основанные на полупроводниковых коммутационных аппаратах, позволяют регулировать параметры питающего напряжения в широких пределах. Помимо управления частотой и амплитудой токов еще имеется возможность регулировать фазовый сдвиг токов питания, что может использоваться на практике для компенсации несимметрии токов.

Как видно, в настоящее время, вопросы взаимодействия расплава и магнитного поля рассматриваются больше с точки зрения физики процесса, поэтому, исходя из вышесказанного, исследование вопроса перемешивания металла бегущим магнитным полем в разрезе электромеханических процессов в линейном индукторе и влияния особенностей питания на характер течений является актуальной тематикой.

**Целью** данной работы является исследование структуры магнитного поля при различных режимах питания индуктора линейной индукционной машины, её влияние на характер течения в жидкометаллическом вторичном элементе под действием бегущего магнитного поля, а также на изменение эффективности перемешивания.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. произвести анализ литературы, выявить основные коллективы и подходы к изучению процессов во вторичном элементе под действием бегущего магнитного поля, а также подходы к повышению эффективности процессов вынужденного теплообмена;
2. разработать новую численную связанную модель электромагнитных и гидродинамических процессов в жидкометаллическом вторичном элементе, учитывающую распределение концентрации пассивной примеси, а также влияние несимметрии питания; показать, что токи, магнитное поле и скорости расплава, вычисленные при помощи модели, соответствуют эксперименту, оценить влияние сдвига фаз токов питания в индукторе линейной индукционной машины на течения в расплаве;
3. установить связь между соотношениями фазовых составляющих тока индуктора и электродинамических усилий, а также скоростей в расплаве; оценить качество перемешивания и особенности распределения примеси в объеме при различных амплитудах и начальных фазах токов питания линейной индукционной машины.

**Объект исследования** — линейные индукционные машины с неравномерными бегущими магнитными полями и жидкометаллическим вторичным элементом.

**Предметом исследования** являются магнитогидродинамические процессы в жидкометаллическом элементе под действием бегущего магнитного поля при изменении симметрии питающих токов и напряжений катушек индуктора

**Научная новизна** состоит в следующем:

1. Выявлено, каким образом изменение начального сдвига фаз токов питания линейного индуктора влияет на течения в жидкометаллическом вторичном элементе.
2. Для анализа течений во вторичном элементе перемешивателя с линейным индуктором впервые применен метод симметричных составляющих, упрощающий учет индуцированных усилий.
3. Показано, что основной вклад в возникновение разнонаправленных усилий в расплаве вносит именно взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитного поля, что, в свою очередь, вызывает появление разнонаправленных течений.
4. Определена зависимость скорости и равномерности распределения примеси в жидкометаллическом вторичном элементе электромагнитного перемешивателя от соотношения и фазового сдвига симметричных составляющих токов линейного индуктора, связанная с характером течений.
5. Сформированы рекомендации по выбору возможных режимов работы электромагнитных перемешивателей с бегущим магнитным полем, учитывающие соотношение симметричных составляющих токов питания индуктора.

**Теоретическая и практическая значимость** выражается в полученном подходе к работе с численными моделями, который учитывает влияние несимметрии питания на физические процессы во вторичном жидкометаллическом элементе при воздействии на него неравномерного бегущего магнитного поля индуктора.

Для анализа течений возможно производить разложение токов индуктора методом симметричных составляющих и анализировать суммарное поле как сумму бегущего магнитного поля в прямом направлении, обратном направлении и пульсирующего магнитного поля, которые создаются соответственно прямой, обратной и нулевой составляющими токов индуктора.

С практической точки зрения, в данной работе приводятся положения, которые можно применить для формирования многоточечных течений сложной конфигурации, а также для управления распределением примеси в объеме и ускорения процессов теплообмена.

Таким образом, результаты, изложенные в диссертационной работе, могут быть использованы для упрощения расчетов режимов работы, а также при проектировании линейных индукционных машин с жидкометаллическим вторичным элементом и источников питания к ним.

**Личный вклад автора** заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку численных моделей, проведение исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

**Методология и методы исследования.** Диссертационное исследование основывается на численных расчетах методом конечных элементов на мультифизической модели, разработанной в среде COMSOL Multiphysics 6.0.

Для этого была создана численная конечно-элементная модель с разделением магнитной и гидродинамической части, т.к. экспериментальные и прогнозируемые значения магнитного числа Рейнольдса для исследуемого объекта не превышают 0,1. Магнитная часть задачи решалась в трехмерной постановке векторного магнитного потенциала, в предположении безындукционной постановки, гидродинамическая – с помощью двухмерной ламинарной или турбулентной  $k - \epsilon$  моделей в зависимости от режима течения и желаемой скорости и точности расчета.

Для анализа режимов работы применяется метод симметричных составляющих, который позволяет рассматривать поле как сумму полей сформированных отдельными составляющими токов питания индуктора.

Полученная модель валидирована в рамках диссертационного исследования на экспериментальной установке лаборатории технологической гидродинамики института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, подтверждено распределение магнитного поля в зазоре с помощью измерений датчиками Холла, интегральные усилия тензодатчиками и скорости течений в расплаве доплеровскими ультразвуковыми анемометрами.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Новые зависимости параметров течений металла, вызванных неоднородным бегущим магнитным полем индуктора электромагнитного перемешивателя, от соотношения амплитуд, а также от фазового угла симметричных составляющих трехфазной системы токов питания индуктора.
2. Зависимости времени эффективного перемешивания (по распределению пассивной примеси) от соотношения амплитуд, а также от фазового угла симметричных составляющих тока питания индуктора.
3. Влияние нулевого проводника на характер течений при питании от симметричного источника напряжения.

4. Зависимость максимума усилий от начальной фазы пульсирующего магнитного поля при наличии бегущего.
5. Теоретическое описание полученных новых зависимостей и рекомендации по выбору режима питания установок электромагнитного перемешивания расплава.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается сравнением данных с экспериментом. Кроме того, результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на четырех конференциях:

- XXI Зимняя школа по механике сплошных сред, ИМСС УрО РАН, г. Пермь, 2019;
- Advanced Problems in Electrotechnology (АРЕТ-2020), УрФУ, г. Екатеринбург, 2020;
- Electromagnetic Processing of Materials conferences, University of Latvia, г. Рига, Латвия, 2021;
- Четвертая Российская конференция по магнитной гидродинамике (РМГД-21), ИМСС УрО РАН, г. Пермь, 2021.

Кроме того, материалы представлены на научном семинаре лаборатории Физической гидродинамики ИМСС УрО РАН 30 июня 2022 года.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика:

- пункт 1 «Развитие общей теории передачи электромагнитной энергии в сложные среды, разработка методов физического и математического моделирования явлений, возникающих при взаимодействии электромагнитного поля с веществом и конструктивными материалами технологических установок»;
- пункт 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнологических комплексов и систем, их оптимизация, разработка алгоритмов эффективного управления»;
- пункт 4 «Разработка новых технологических процессов для получения чистых металлов, сплавов с заданными физическими и химическими свойствами, в том числе для нужд полупроводниковой промышленности».

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в трех научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, и входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS.

**Диссертационная работа** была выполнена при поддержке гранта РФФИ «Исследование влияния неравномерного бегущего магнитного поля на характер магнитогидродинамических явлений в жидких металлах» № 19-38-90236 Аспиранты.



## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, выполнен анализ научных разработок в рассматриваемой области, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены положения, выносимые на защиту и приведены сведения о достоверности результатов.

**Первая глава** посвящена обзору литературы по теме диссертационной работы, приводятся уравнения, описывающие магнитогидродинамические явления, произведен анализ существующих способов исследования линейных индукционной машин с жидкометаллическим вторичным элементом, а так же испытательных установок. Приведено описание существующих численных методов моделирования и основных программных пакетов.

На основе обзора выбран предмет исследования, показана необходимость учета несимметрии фаз питания индуктора ввиду искажения структуры магнитного поля. Для учета предложено рассматривать симметричные составляющие токов питания индуктора.

Был сформулирован подход к диссертационному исследованию. Предложена методика исследования электромагнитных процессов и процессов массопереноса в расплаве при помощи метода конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics с учетом разложения токов питания индуктора методом симметричных составляющих.

Во **второй главе** приведено подробное описание установки и исследуемой численной модели электромагнитных и гидродинамических процессов в электромагнитном перемешивателе с основными допущениями.

В качестве исследуемого объекта выбрана линейная индукционная машина со жидкометаллическим вторичным элементом из легкоплавкого металлического сплава эвтектики GaSnZn, помещенного в прямоугольную катушку, основные размеры которой указаны на рисунке 1.

Электромагнитный анализ проведен методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics. Расчет выполнялся в трехмерной постановке задачи, чтобы учесть все краевые эффекты и зубчатость индуктора. Ранее этот подход был проверен путем сравнения профилей плотности магнитного потока и интегральной электромагнитной силы с экспериментальными измерениями, которые представлены в работах других авторов.

Электромагнитное поле, вызывающее силы Лоренца, может быть описано с помощью следующих уравнений в А-формулировке (1), полученных из уравнений Максвелла во временно-гармонической форме

$$-j\omega\sigma\mu\underline{\mathbf{A}} + \sigma\mu \cdot \text{div}(\text{grad}\underline{\mathbf{A}}) = \mu\underline{\mathbf{J}}, \quad (1)$$

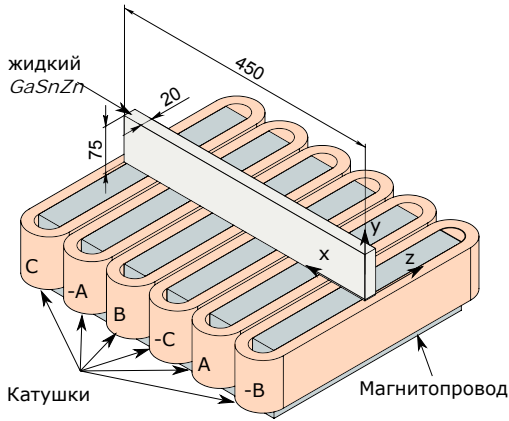


Рис. 1 — Внешний вид исследуемой установки

где  $j$  - мнимая единица,

$\omega$  - угловая частота,

$\mu$  - магнитная проницаемость,

$\sigma$  - электропроводность,

$\underline{\mathbf{J}}$  - комплексное значение плотности тока,

$\underline{\mathbf{A}}$  - комплексное значение магнитного векторного потенциала.

Усредненные электромагнитные усилия рассчитываются непосредственно по следующему выражению:

$$\mathbf{F}_{em} = \frac{1}{2} \Re(\underline{\mathbf{J}} \times \underline{\mathbf{B}}^*). \quad (2)$$

Расчетная область ограничена сферой, внутри которой располагается индуктор и вторичный элемент. В качестве граничных условий на внешней границе сферы задается нулевой магнитный векторный потенциал. Сетка состоит из 132735 тетраэдров, в области воздушного зазора сетка дополнительно учащена для учета зубчатости индуктора (рис. 2).

Для расчетов гидродинамики использовался модуль «Turbulent Flow,  $k - \epsilon$ », расчет велся в стационарной постановке, вычислялись усредненные скорости в установившемся режиме. Двухмерная  $k - \epsilon$  модель турбулентности была выбрана из-за того, что этот тип модели обеспечивает хорошее первое приближение для последующего решения с использованием других моделей, а также низкие требования к плотности сетки вблизи стенок. Кроме того, экспериментальные данные показывает качественное схождение с результатами, полученными при численном моделировании.

Для этого считалось уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Моделируемые величины усредняются по времени:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}', \quad (3)$$

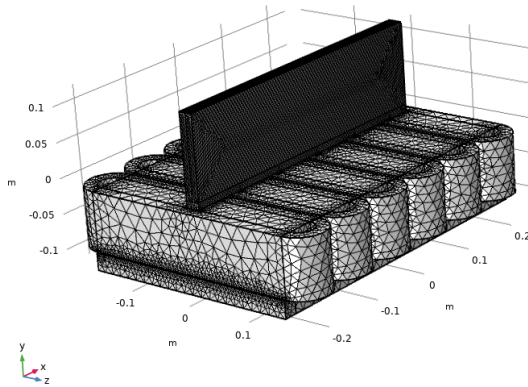


Рис. 2 — Сетка для электромагнитной задачи

где  $\mathbf{u}$  — поле скоростей,

$\bar{\mathbf{u}}$  — усредненных по времени скоростей,

$\mathbf{u}'$  — пульсации скорости.

В дальнейшем уравнение Навье-Стокса решается относительно усредненных величин, а флуктуации учитываются введенной величиной, называемой тензором турбулентным напряжением (Reynolds stress tensor)  $-\rho\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ . Наиболее распространенным подходом является предположение, что турбулентность действует как дополнительный вязкий эффект, и учитывается следующим образом:

$$-\rho\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} = \mu_T (\nabla\bar{\mathbf{u}} + \nabla\bar{\mathbf{u}}^T). \quad (4)$$

Кроме уравнений Навье-Стокса, вводятся два дополнительных транспортных уравнения, которые решаются относительно вспомогательных величин турбулентной кинетической энергии  $k$  и диссипации  $\epsilon$ , они требуются для определения турбулентной вязкости:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

Сами же уравнения модели имеют следующий вид:

$$\rho\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (6)$$

$$\rho\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla(\bar{\mathbf{u}}) = -\nabla\bar{p} + \nabla \cdot (\mu(\nabla\bar{\mathbf{u}} + \nabla\bar{\mathbf{u}}^T)) - \rho\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} + \bar{\mathbf{F}} \quad (7)$$

где  $p$  — давление;

$\mu$  — динамическая вязкость жидкости;

$\bar{\mathbf{F}}$  — электродинамическое усилие, полученное на шаге электромагнитного расчета.

уравнении переноса для диссипации турбулентной кинетической энергии  $k$ :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

где

$$P_k = \mu_T \left( \nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (9)$$

И транспортное уравнение для диссипации  $\varepsilon$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

Используются следующие модельные коэффициенты:  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$

Граничные условия для всех стенок, кроме верхней - стандартные функции стенки:  $\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln Ey^+$ , где  $E = 9.8$ .

Режимы работы индуктора задаются при помощи метода симметричных составляющих, при условии линейности магнитопровода и безындукционности формулировки (рис. 3). Суть его – в предварительном расчете наведенных токов и магнитных индукций в жидкометаллическом вторичном элементе, вызываемых единичными симметричными составляющими токов питания линейного индуктора перемешивателя бегущего магнитного поля, последующем суммировании с учетом комплексных симметричных составляющих заданных токов питания линейного индуктора перемешивателя бегущего магнитного поля и вычислении электродинамических усилий. Таким образом, единичное решение электромагнитной задачи в трехмерной постановке занимает около 5 минут, тогда как применение алгоритма снижает время до 11 секунд. Таким образом, алгоритм позволяет не пересчитывать электромагнитную задачу.

Показано, что принятая при составлении моделей система допущений не оказывает существенного влияния на точность расчета усилий и скоростей в расплаве. Расхождение в экспериментальных и расчетных данных не превышает 10% при оценке усилий и 5% при оценке скоростей. Таким образом, разработанная модель может вполне использоваться для анализа режимов работы перемешивателя бегущего магнитного поля.

**Третья глава** посвящена исследованию фазовых сдвигов питающих токов в линейной индукционной машине. В ранних работах автора было показано, что несимметрия токов может оказывать значительное влияние на характер течений, поэтому было предложено рассмотреть зависимость поля от звезды токов питания, в качестве переменных использовались амплитуды токов и абсолютные фазовые сдвиги по фазам  $B$  и  $C$ . На данном

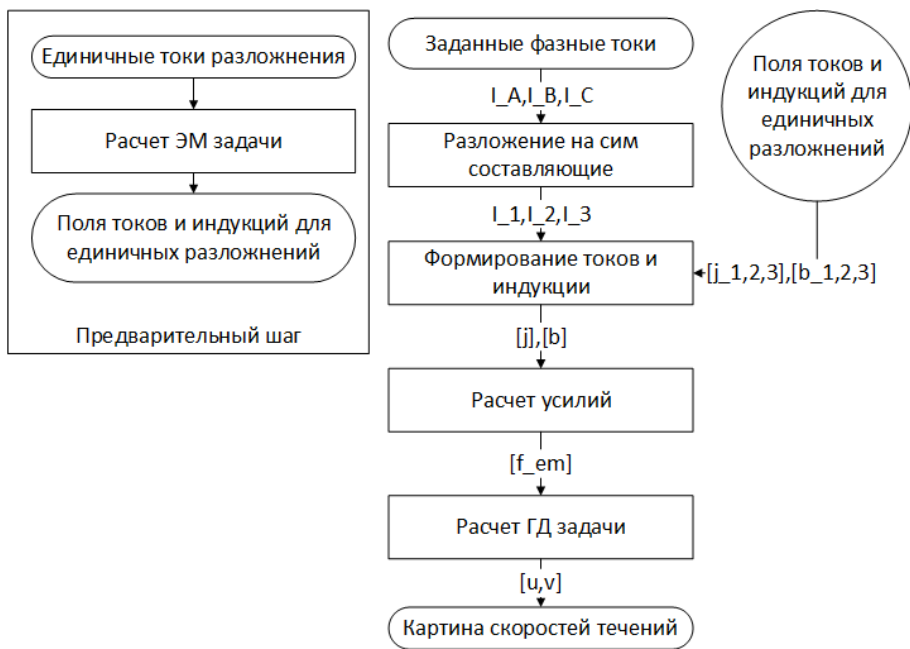


Рис. 3 — Алгоритм расчета полей скоростей

этапе, для упрощения задачи, автором был исследован только абсолютный фазовый сдвиг токов линейного индуктора, изменение амплитуды не рассматривалось. Результаты исследования были верифицированы на эксперименте.

Поскольку бегущее магнитное поле задается с помощью трехфазного тока, мы можем варьировать только фазы  $B$  и  $C$ , так как определяющими параметрами являются фазовые сдвиги  $\phi_{AB}$ ,  $\phi_{BC}$  и  $\phi_{CA}$  между токами  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$ , соответственно, а сумма сдвигов равна  $\phi_{AB} + \phi_{BC} + \phi_{CA} = 360^\circ$ . Таким образом, задавая два параметра, можно определить третий. Для удобства первичного анализа варьировались абсолютные углы фазового сдвига  $\phi_{AB}$  и  $\phi_{AC}$ .

Показано, что при изменении углов варьируется распределение усилий в расплаве (рис. 4). Видно, что возникают разнонаправленные усилия в одном и том же объеме, что приводит к возникновению вихрей в расплаве.

Управление фазовым сдвигом позволяет получить режимы с асимметричным распределением сил в расплаве, что приводит к увеличению числа вихрей, действующих в замкнутом объеме, и перераспределению скоростей при сохранении амплитудных значений (рис. 5). Видно, что при диапазоне углов фазового сдвига  $45 < \phi_{AB} < 135$ ,  $45 < \phi_{AC} < 135$  вихрей (рис. 6) достигает наибольшего значения, а при диапазоне углов фазового сдвига  $0 < \phi_{AB} < 90$ ,  $0 < \phi_{AC} < 45$  — один крупномасштабный вихрь.

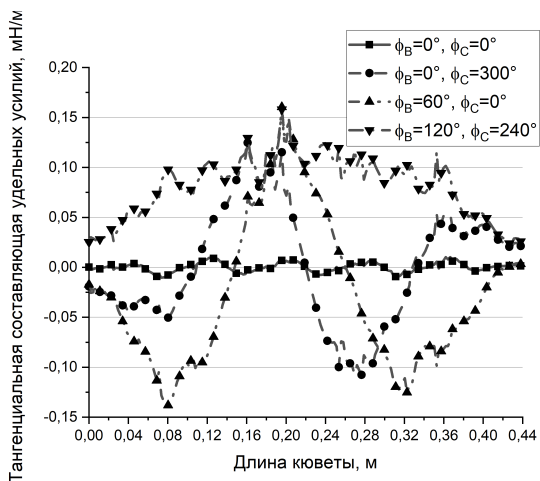


Рис. 4 — Зависимость усилий от фазовых углов

Кроме того, наблюдается антисимметрия по оси равенства значений углов. Показано, что усилие в расплаве является функцией как минимум двух

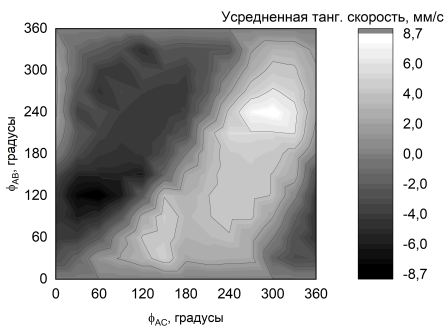


Рис. 5 — Зависимость тангенциальных скоростей вдоль средней линии кюветы от фазовых углов токов питания

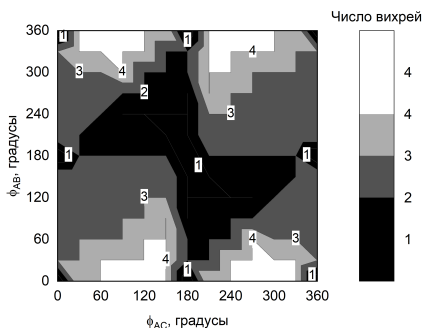


Рис. 6 — Количество вихрей в кювете в зависимости от фазовых углов токов питания

переменных (относительных фазовых углов токов линейного индуктора), что на практике усложняет рассмотрение зависимости характера течений от параметров питания, а изменение фазового сдвига коренным образом меняет характер течений в расплаве, позволяя получать различные режимы перемешивания. Однако однозначной зависимости от соотношения

фазовых углов токов питания и течениями установить не удалось. Для получения соотношений принято решение использовать метод симметричных составляющих, о чем речь пойдет в следующей главе.

**В четвертой главе** исследуется влияние несимметрии токов статора методом симметричных составляющих. Он применяется для упрощения расчетов электродинамического усилия, позволяя представить решение абстрактной задачи как сумму трех решений с линейными масштабирующими коэффициентами. Кроме того, в таком случае упрощается зависимость сил от параметров питающих токов, она сводится от многопараметрической к зависимости с разделением переменных и линейными коэффициентами.

Приводится обоснование разложения токов питания линейного индуктора на симметричные составляющие по согласно формулам:

$$\underline{I}_{\text{sum}} = \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = k_0 \underline{I}'_0 + k_1 \underline{I}'_1 + k_2 \underline{I}'_3 \quad (11)$$

$$\underline{B}_{\text{sum}} = \underline{B}_0 + \underline{B}_1 + \underline{B}_2 = k_0 \underline{B}'_0 + k_1 \underline{B}'_1 + k_2 \underline{B}'_3 \quad (12)$$

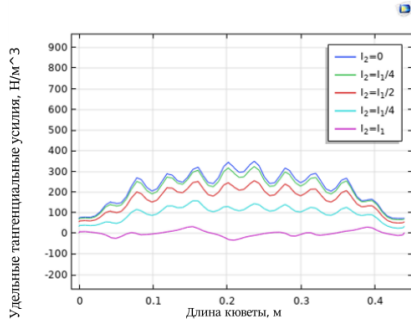
$$\underline{F}_{\text{sum}} = \underline{I}_{\text{sum}} \underline{B}_{\text{sum}} = (k_0 \underline{I}'_0 + k_1 \underline{I}'_1 + k_2 \underline{I}'_3) \times (k_0 \underline{B}'_0 + k_1 \underline{B}'_1 + k_2 \underline{B}'_3) \quad (13)$$

Обобщены результаты при помощи метода симметричных составляющих. Данное допущение применимо в случае линейности процессов, т.е. при магнитном числе Рейнольдса  $Re_m \ll 1$  и отсутствии насыщения магнитопровода (при магнитной индукции  $B < 1,4$  для большинства электротехнических сталей). Показано, что основной вклад в несимметрию вносит взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитных полей, наложенных друг на друга, тогда как по отдельности существует единственный вихрь или незначительные пульсации.

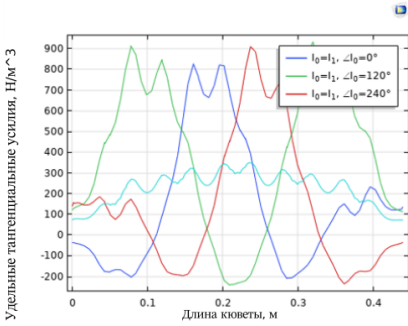
$$\begin{aligned} F_{\text{sum}} = & k_0 k_0 I'_0 \times B'_0 + k_1 k_1 I'_1 \times B'_1 + \\ & + k_2 k_2 I'_2 \times B'_2 + (k_0 k_1 I'_0 \times B'_1 + k_1 k_0 I'_1 \times B'_0) + (k_0 k_2 I'_0 \times B'_2 + k_2 k_0 I'_2 \times B'_0) + \\ & + (k_1 k_2 I'_1 \times B'_2 + k_1 k_2 I'_2 \times B'_1) = k_1^2 f_1(x) + k_2^2 f_2(x) + k_0^2 f_0(x) + \\ & + k_0 k_1 f_{01}((\phi_0 - \phi_1), x) + k_1 k_0 f_{02}((\phi_0 - \phi_2), x) + k_1 k_2 f_{12}((\phi_1 - \phi_2), x), \quad (14) \end{aligned}$$

Показано, что наличие обратной составляющей тока индуктора пропорционально ослабляет электродинамические усилия, создаваемые прямой составляющей токов питания индуктора (рис. 7а - 7в), а наличие нулевой составляющей приводит к возникновению экстремумов распределения усилий из-за взаимодействия магнитного поля нулевой составляющей токов индуктора с магнитным полем прямой составляющей токов. Таким образом, для формирования стабильного одновихревого течения следует исключать нулевую составляющую токов из питания обмоток индуктора. Для создания сложных течений следует напротив, усиливать

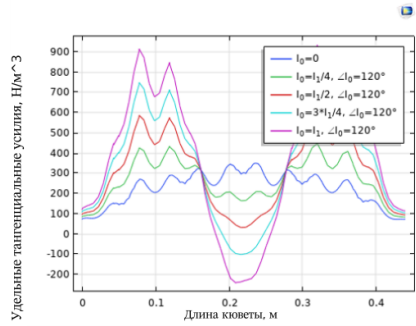
пульсирующее поле либо внося изменения в конструкцию индуктора, например, добавляя дополнительные обмотки индуктора, либо в режимы питания индуктора, например, поддерживая токи обмоток с помощью обратных связей.



а)



б)



в)

Рис. 7 — Тангенциальные электродинамические усилия в зависимости от: а) соотношения  $I_2$  к  $I_1$ ; б) фазового сдвига между  $\angle I_0$  и  $I_0 = I_1$ ; в) соотношения  $I_0$  к  $I_1$ .

Таким образом, суммарное поле в ряде случаев может быть представлено как сумма полей токов отдельных компонент. Анализируя приведенные выше результаты, можно показать, что результирующая сила может быть получена как сумма отдельных компонентов с учетом амплитуды. На основе уравнения (14), мы получаем графики силы для отдельных компонентов. По оси  $x$  - относительная координата вдоль ячейки, по оси  $y$  - начальный фазовый сдвиг. Влияние амплитуды не исследовалось, так как оно очевидно квадратично.



Как видно из рисунка 8а, наибольший вклад в асимметрию течений вносит взаимодействие между бегущим и пульсирующим магнитным полем, а положение экстремумов линейно зависит от угла между нулем и прямой/обратной последовательностью. Видно, что графики равны с точностью до знака. При  $I = I_0$  возникает магнитное поле, перемещающееся вдоль оси  $x$ , и многовихревая структура течений. Видно, что наибольший вклад в силу в линейной индукционной машине данной конструкции вносит взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитного поля.

Усилия, создаваемые прямой и обратной последовательностью токов статора, не зависят от начальной фазы токов, что очевидно (рис. 8б). При  $I = I_2$  бегущее поле направлено против оси  $x$  и поток инвертируется.

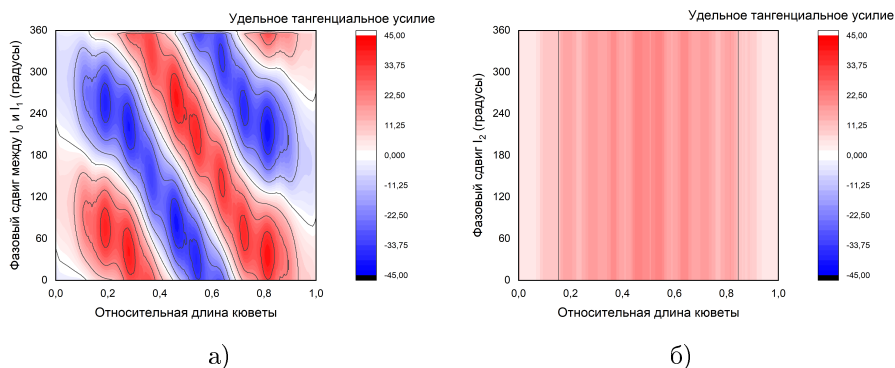


Рис. 8 — Зависимость от фазового сдвига распределения по длине кюветы тангенциальных усилий от: а) взаимодействия прямой и нулевой составляющей токов питания индуктора  $f_{01}$ ; б) прямой составляющей токов питания индуктора  $f_1$ .

Таким образом, в терминах прямой, обратной и нулевой последовательности становится понятным объяснение структуры вихря. Пульсации усилий, вызываемые пульсирующим магнитным полем, незначительны, в инженерных расчетах ими можно пренебречь, так как составляет менее 10 процентов от основной равно как и взаимодействие встречно направленных бегущих полей.

Кроме того, исследуется распределение пассивной примеси в зависимости от симметричных составляющих. Ранее было показано, что обратная составляющая в целом снижает амплитуду удельных усилий, поэтому рассматривает только влияние нулевой.

Моделирование распределение пассивной примеси описывается с помощью диффузионно-конвекционного баланса масс:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i + c_i^u) = R_i, \quad (15)$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии;  $c_i$  – концентрация вещества.

Таким образом учитывалась и диффузионный и конвекционный механизмы перемешивания.

Перемешивание с несимметрией формирует несколько вихрей, поэтому нет сильного перемешивания по всему объему, коэффициенты неоднородности выравниваются хуже, однако в ряде режимов примеси, внесенные в верхней части расплава замешивается лучше из-за меньшего размера вихря и потоков, направленных непосредственно ко дну. Продемонстрировано, что собственные усилия не зависят от фазового угла симметричных составляющих токов питания индуктора, а только от амплитуды, в то же время при взаимодействии полей важно учитывать как амплитуду, так и разность фазовых сдвигов симметричных составляющих токов.

Видно, что область неоднородна, изменение параметров может приводить как к увеличению, так и к уменьшению скорости потоков. Разница между максимальным и минимальным значением может достигать до двух раз. В диапазоне углов 20-200 число Рейнольдса увеличивается, а в диапазоне 200-360, напротив, уменьшается. Это может быть обусловлено изменением числа вихрей, как видно по рисунку 9а. Из графика 9б видно, что с увеличением соотношения амплитуд нулевой и прямой составляющих токов линейного индуктора увеличивается нормальная составляющая скорости. Таким образом, усиливается перемешивание верхних и нижних слоев расплава.

Показано, что основной вклад в несимметрию вносит взаимодействие бегущего и пульсирующего магнитных полей, наложенных друг на друга, тогда как по отдельности существует единственный вихрь или незначительные пульсации скорости расплава.

Использование метода симметричных составляющих позволяет уменьшить число переменных, влияющих на силы, создаваемые неравномерным бегущим полем. Выявлено, что основной вклад в создание тангенциальных усилий в расплаве вносит магнитное поле, создаваемое прямой составляющей токов питания индуктора, обратной составляющей, а также взаимодействие этих бегущих полей с полем от нулевой составляющей токов питания. Таким образом для оценки возможно использовать четыре слагаемых, которые с достаточной точностью могут быть аппроксимированы. Разложение может помочь при аналитическом анализе, так как полученные карты усилий можно подвергнуть аппроксимации и получить аналитические зависимости усилий от токов.

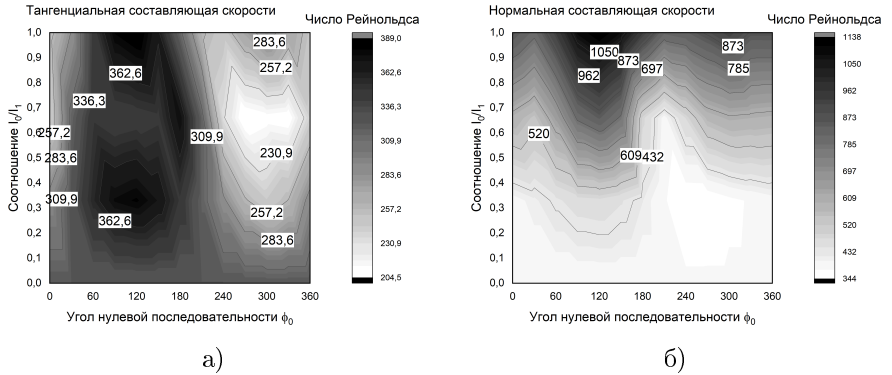


Рис. 9 — Зависимость числа Рейнольдса для: а) тангенциальной составляющей скорости; б) для нормальной составляющей скорости.

В качестве примера использования данного метода, получены карты зависимости (рис. 10) времени эффективного перемешивания от управляющих параметров (соотношении амплитуд нулевой составляющей токов питания линейного индуктора к прямой и фазового сдвига нулевой составляющей токов питания).

Для оценки степени перемешивания вводится коэффициент неоднородности, который вычисляется через соотношение между стандартным отклонением концентрации примеси  $C_i$  во всех  $n$  точках кюветы от конечной концентрации примеси после перемешивания (в момент времени  $t$ ) и тем же стандартным отклонением в начальный момент времени:

$$\xi(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{C}(\tau) - C_i(\tau))^2 |_{\tau=t}}{\sum_{i=1}^n (\bar{C}(\tau) - C_i(\tau))^2 |_{\tau=0}}}, \quad (16)$$

где  $\bar{C}(\tau)$  — средняя концентрация в объеме кюветы в момент времени  $\tau$ ,

Также вводится характерное время перемешивания  $t_{eff}$ , которое определяет время, когда параметр  $\xi(t)$  уменьшается до  $\xi(t_{eff})$ . Как видно из формулы (16), в начальный момент времени коэффициент неоднородности всегда равен единице и с течением времени уменьшается. Это обусловлено тем, что локальная концентрация примеси не может увеличиваться, а только уменьшаться. Таким образом, эффективное время перемешивания определяется как время, за которое данный коэффициент  $\xi(t)$  становится равным 0.1.

Выявлено наличие режимов, при которых эффективность перемешивания увеличиваются до двух раз по сравнению с перемешиванием одиночным бегущим магнитным полем.

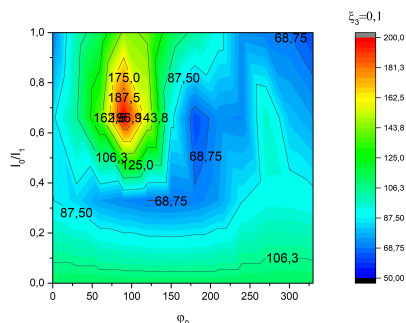


Рис. 10 — Время эффективного перемешивания примеси при внесении в нижней части кюветы от соотношении амплитуд нулевой составляющей токов питания линейного индуктора к прямой и фазового сдвига нулевой составляющей токов питания

Таким образом, для управления содержанием примеси в расплаве возможно применять инжекцию токов нулевой последовательности, причем важно учитывать как амплитуду, так и фазу. В зависимости от режима будет обеспечиваться различное время перемешивания, причем для различных областей внесения оной характер временной зависимости гомогенизации будет различаться принципиальным образом.

**В заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. При анализе литературы выявлен метод, который позволяет осуществлять управление течениями во вторичном жидкометаллическом элементе без внесения изменений в конструкцию линейного индуктора. Этот метод основывается на изменении параметров питающих токов, а именно амплитуды и фазового сдвига.
2. Разработан алгоритм, который позволяет использовать метод симметричных составляющих для упрощения расчета и анализа электродинамических усилий во вторичном жидкометаллическом элементе. Суммарное усилие может быть представлено как сумма шести отдельных компонент, трех собственных и трех, связанных с взаимодействием полей, вызываемых отдельными составляющими токов линейного индуктора. Единичное решение электромагнитной задачи в трехмерной постановке занимает около 5 минут, тогда как применение алгоритма снижает время расчета до менее чем минуты. Подобное разложение позволяет получать карты усилий, которые зависят от малого числа переменных, что упрощает их анализ. Область применения такого алгоритма – установки с ненасыщенными магнитопроводами и малым магнитным числом Рейнольдса.

3. Выявлено, что основной вклад в создание тангенциальных усилий в расплаве вносит бегущее магнитное поле, создаваемое прямой составляющей токов питания индуктора, обратной составляющей, а также взаимодействие этих бегущих полей с пульсирующим полем от нулевой составляющей токов питания. Таким образом, для оценки возможно использовать четыре слагаемых, которые с достаточной точностью аппроксимируются функциями, которые, в свою очередь, зависят от амплитуды и фазового сдвига соответствующих составляющих токов питания линейного индуктора.
4. Получены зависимости тангенциальной скорости расплава от угла сдвига фаз и относительной длины кюветы при соотношении амплитуд нулевой составляющей токов питания линейного индуктора. Построены зависимости числа Рейнольдса для тангенциальной и нормальной составляющей скоростей расплава в жидкометаллическом элементе от соотношения амплитуд нулевой составляющей токов питания линейного индуктора к прямой и фазового сдвига нулевой составляющей токов питания. Выявлена корреляция числа вихрей в объеме от числа Рейнольдса для нормальной составляющей скорости.
5. Произведена оценка эффективности перемешивания через время распределения примеси во вторичном жидкометаллическом элементе. Получены карты зависимости времени эффективного перемешивания от управляющих параметров (соотношений амплитуд нулевой составляющей токов питания линейного индуктора к прямой и фазового сдвига нулевой составляющей токов питания). Выявлено наличие режимов, при которых эффективность перемешивания увеличивается до двух раз по сравнению с перемешиванием одиночным бегущим магнитным полем.

**Перспективами дальнейшей разработки темы являются:**

1. Повышение эффективности использования электромагнитных перемешивателей в металлургическом производстве (например, при получении  $LiB$  композитов в производстве химических источников тока), за счет управляемого воздействия на расплав и характер течений для влияния на процессы кристаллизации и распределения примеси, что позволит увеличить производительность, выход годного материала, увеличить объем получаемых слитков. Для этого, исходя из требуемых условий перемешивания, выбираются режимы работы источника питания, т.е. рассчитываются соотношения прямой, обратной и нулевой составляющей токов трехфазной системы, фазовые токи и соответственно требуемое напряжение источника.
2. Применение полученных результатов для анализа электромагнитных перемешивателей различных конструкций, при условии

ненасыщенности магнитопровода и при магнитном числе Рейнольдса менее 1, а также перемешивателей с накладывающимися бегущими и вращающимися электромагнитными полями;

3. Разработка алгоритмов управления источников питания электромагнитных перемешивателей для практической реализации, а также переход от составляющих токов в катушках индуктора к фазным напряжениям;
4. Дальнейшее обобщение полученных результатов, исследование зависимости числа Рейнольдса от характеристических чисел, например безразмерного силового числа, а также дальнейшее применение к описанию процессов кристаллизации.

### Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Sokolov I.** The influence of traveling magnetic field inductor asymmetric power supply on the liquid metal flow / Sokolov, I., Shvydkiy, E., Losev, G., Bolotin, K., Bychkov, S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 581. – 2019. – P. 012002. (0,4 п. л. / 0,25 п. л.; Scopus, Web of Science).
2. **Sokolov I.** Numerical study of TMF inductor phase shift influence on liquid metal flow in a rectangular cell / Sokolov, I., Shvydkiy, E., Losev, G., Bychkov, S., Frizen, V. // Magnetohydrodynamics. 2021. V. 57, No 1. P. 95-103. (0,18 п. л. / 0,09 п. л.; Scopus, Web of Science).
3. Losev G. Adaptation of the linear induction machine power supply to the tasks of liquid metals transportation and stirring / Losev, G., Mamykin, A., Eltishchev, V., **Sokolov I.** // Magnetohydrodynamics. 2021. V. 57, No 1. P. 85-94. (0,17 п. л. / 0,08 п. л.; Scopus, Web of Science).

*Соколов Игорь Владимирович*

Влияние структуры магнитного поля на характер магнитогидродинамических течений в электромагнитных перемешивателях расплавов

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_